SIMULACIÓN CFD PARA DETERMINAR EL POTENCIAL DEL RECURSO EÓLICO EN VALLEDUPAR, COLOMBIA

SANTIAGO TACHA MALAVER

DANIEL ANDRES FLOREZ SILVA

PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO EN ENERGÍAS

DIRECTOR:

ARNUL DAVID PAZ ARANGUREN

INGENIERO DE PETROLEOS

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS

BOGOTÁ D.C.

2025

NOTA DE ACEPTACIÓN

_____
_____
_____
_____
_____
_____

_____ _____

Firma del director Firma del presidente del jurado

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

Bogotá D.C., Febrero del 2025

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica

Dra. María Fernanda Vega de Mendoza

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ramiro Augusto Forero Corzo

Vicerrectora de investigaciones y extensión.

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decana Facultad de Ingenierías

Ing. Carlos Mauricio Veloza Villamil

Director Departamento de Energías/Programa de Ingeniería de Petróleos

Ing. María Angelica Acosta Pérez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento, en primer lugar, a mi mamá, quien siempre estuvo a mi lado brindándome su apoyo incondicional y siendo el pilar fundamental en la persona que soy hoy. También deseo agradecer a mis amigos y compañeros de carrera, quienes me acompañaron a lo largo de este proyecto con consejos y su valiosa ayuda como los son Cristian Calero, Ofid Murcia y David Delgado.

A mi gran amigo y compañero de tesis, Daniel Flórez Silva, reconozco su dedicación, motivación y tiempo, elementos clave para alcanzar esta meta tan importante. Su apoyo constante en los momentos más desafiantes fue indispensable para lograr este objetivo.

Finalmente, quiero extender un agradecimiento especial a mi colega Oscar Mauricio Ochoa. Su vasto conocimiento en programación fue una pieza esencial en la elaboración de esta tesis. Su apoyo no solo fue técnico, sino que también inspiró confianza y permitió que este proyecto alcanzara su máximo potencial. Gracias a su guía, superamos los retos más complejos y logramos materializar este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible este proyecto de grado. En primer lugar, a mis padres y a mi hermano, cuyo amor incondicional y apoyo constante fueron mi mayor fuente de inspiración y fortaleza. A mis amigos, especialmente a Santiago Tacha Malaver, con quien realicé este proyecto y compartí tanto los desafíos como los logros a lo largo del camino. A la comunidad Uni-americana, por proporcionar un entorno académico enriquecedor que impulsó mi crecimiento profesional y personal. Y, de manera especial, a mi colega Oscar Mauricio Ochoa, quien nos acompañó y asistió de manera teórica y práctica durante todo el proceso de investigación y desarrollo de este proyecto. Su ayuda fue fundamental para superar los desafíos técnicos y conceptuales, y por ello le estoy profundamente agradecido.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESÚMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	15
1. MARCO TEORICO	16
1.1. Fundamentos de la energía eólica	16
1.1.1. Introducción al Potencial Eólico	16
1.1.2. El Viento: Parámetro Clave en la Energía Eólica	17
1.1.3. Distribución De Weibull	19
1.2. Principios esenciales de la dinámica de fluidos y simulación por computadora	21
1.2.1. Dinámica de fluidos computacional (CFD)	21
1.2.2. Ecuaciones de Gobierno	21
1.2.3. Modelo de Discretización	23
1.2.4. Algoritmos de Solución	23
1.2.5. Modelos de Turbulencia	25
2. METODOLOGÍA Y DATOS	28
2.1. Fase 1: Definir las escalas Meso y Micro a partir de la topografía de Valledupar	30
2.1.1. Dominio computacional	30
2.2. Fase 2: Construir los modelos computacionales para las simulaciones Meso y Micro	31
2.2.1. Condiciones de Frontera	34
2.2.2. Características del Fluido	37
2.2.3. Parámetros Numéricos y Algoritmo de Solución	37

2.3. Fase 3: Ejecutar las simulaciones con sus respectivos modelos computacionales. 39

2.4. Fase 4: Validar los resultados con los datos de la estación meteorológica de Valledupar. 40

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS 41

3.1. Definir las escalas meso y micro para las simulaciones a partir de la topografía de Valledupar 41

3.2. Construir los modelos computacionales en CFD para las simulaciones meso y micro 42

3.3. Ejecutar los modelos computacionales construidos 42

3.3.1. Análisis de independencia de malla 42

3.4. Validar los resultados teniendo en cuenta los datos reales de la estación meteorológica ubicada en el aeropuerto internacional Alfonso López Pumarejo-Valledupar 46

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 51

REFERENCIAS 53

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1 Energía Eólica 17

Figura 2 *Vientos Globales* 18

Figura 3 *Distribución de Weibull Normal* 20

Figura 4 *Diagrama de Flujo del Algoritmo SIMPLE* 24

Figura 5 *Diagrama de Flujo del Algoritmo PISO* 25

Figura 6 *Diagrama de flujo de la metodología* 29

Figura 7 *Configuración del enmallado* 33

Figura 8 *Configuración de algoritmo de solución* 38

Figura 9 *Configuración modelo de turbulencia* 39

Figura 10 *Dominio Meso y Micro* 41

Figura 11 *Resultados Simulación Meso con velocidad inicial de 7.22 m/s.* 43

Figura 12 *Resultados Simulación Meso con velocidad inicial de 10.55 m/s.* 44

Figura 13 *Resultados Simulación Meso con velocidad inicial de 13.23 m/s.* 45

Figura 14 *Resultados Simulación Micro con velocidades iniciales de 7.22 n/s, 10.55 m/s y 13.23 m/s* 46

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1 *Suavizado de la topografía del dominio meso* 31

Tabla 2 *Enmallado (discretización) del dominio meso para los tres niveles de refinamiento* 32

Tabla 3 *Fronteras definidas en el dominio* 35

Tabla 4 *Mapeo para la condición de frontera inlet del dominio micro* 36

Tabla 5 *Resultados de Simulaciones Meso* 47

Tabla 6 *Resultados Simulaciones Micro* 49

LISTA DE ABREVIACIONES

Símbolos

v : Velocidad del viento.

k: Parámetro de forma.

c: Parámetro de escala

ρ: Densidad del fluido

t: Tiempo

u: Componente de velocidad en x

v: Componente de velocidad en y

w: Componente de velocidad en z

P: Presión

Re: Número de Reynolds

τ: Esfuerzo cortante

RESÚMEN

Este trabajo de grado se enfoca en evaluar el potencial de la energía eólica en la ciudad de Valledupar, Colombia, utilizando como parámetro principal la velocidad del viento. Para ello, se emplea el software OpenFOAM-v2406, que permite realizar simulaciones detalladas del comportamiento del viento en la región.

La metodología del proyecto combina datos de mapas y atlas de vientos disponibles, junto con estudios de dinámica de fluidos computacional (CFD). Esto permite simular el comportamiento del viento en escalas meso y micro, lo que proporciona información más precisa sobre el recurso eólico local. Al reducir la escala de los datos, el estudio busca ofrecer una representación más fiel de las condiciones del viento en Valledupar, superando las limitaciones de los datos globales que suelen ser interpolados y no reflejan adecuadamente las características locales.

El objetivo es obtener resultados que ayuden a determinar el potencial eólico de la zona, facilitando la toma de decisiones sobre la implementación de turbinas eólicas y contribuyendo al desarrollo de soluciones sostenibles para el suministro de energía en áreas que enfrentan desafíos energéticos. A través de este enfoque, el trabajo busca no solo evaluar el potencial eólico, sino también contribuir al desarrollo energético de la región, mejorando el acceso a fuentes de energía renovable.

PALABRAS CLAVE:

CFD, Potencial Eólico, Escala Meso, Escala Micro, Topografía, Velocidad del Viento

INTRODUCCIÓN

Según la página web “Acciona” El aprovechamiento de las energías renovables ha cobrado una importancia creciente en el contexto global debido a la necesidad urgente de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el cambio climático [1]. Entre las fuentes de energía renovable, la energía eólica se destaca por su potencial de generación de energía limpia y sostenible, además de considerarse una energía autóctona debido a su disponibilidad en la totalidad del planeta [1]. En este sentido, la evaluación del recurso eólico en áreas específicas es fundamental para determinar la viabilidad de futuros proyectos de energía eólica.

De acuerdo al IDEAM, Valledupar, una ciudad ubicada en la región Caribe de Colombia, presenta características geográficas y climáticas que podrían ser favorables para el desarrollo de la energía eólica [2]. No obstante, para confirmar el potencial, es esencial realizar un estudio detallado de la velocidad del viento en la zona. Además, la región Caribe se destaca por ser una de las de mayor consumo energético en el país, alcanzando un consumo de 1.759,72 GWh en febrero de 2024, lo que representa una proporción significativa de la demanda nacional. Sin embargo, la región enfrenta importantes desafíos en su infraestructura eléctrica, ya que muchas zonas no están conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN), dependiendo de soluciones locales como plantas diésel, que no siempre son sostenibles ni eficientes. Acorde a Brayan Becerra. Este contexto resalta la urgencia de diversificar la matriz energética y de buscar alternativas como la energía eólica, que podrían no solo garantizar un suministro más confiable, sino también contribuir al desarrollo sostenible. [3]

Para este tipo de estudios en la actualidad la dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta que permite realizar estudios por medio de simulaciones para el comportamiento de fluidos en diferentes aplicaciones, lo cual permite tener distintos tipos de resultados, tales como la velocidad, presión, densidad y temperatura del fluido a trabajar.

Este proyecto se enfoca en conocer la velocidad del viento, por medio de simulaciones CFD a escala meso y micro teniendo en cuenta la topografía de Valledupar, con el

objetivo de evaluar su potencial eólico y así dar a conocer una herramienta tecnológica que permita contribuir al desarrollo sostenible de la región. La cámara de comercio de Valledupar a buscando ofrecer una solución viable para enfrentar la problemática de acceso limitado a la energía eléctrica en el departamento del Cesar, donde una significativa parte de la población carece de este servicio esencial. Considerando que el 5,6% de la población en el Cesar no cuenta con acceso a electricidad, y que las interrupciones promedio anuales alcanzan las 100 horas, resulta evidente la urgencia de implementar alternativas renovables y sostenibles. Mediante la generación de energía eólica, se espera no solo cerrar estas brechas energéticas, sino también reducir la dependencia de fuentes convencionales que, en muchos casos, implican altos costos y generan impactos negativos en el medio ambiente. [4]

Dichas simulaciones se van a realizar teniendo en cuenta como datos de entrada los datos promedio extraídos del atlas de vientos de Colombia, con el fin de validar si los resultados de dichas simulaciones concuerdan con los datos reales del atlas. Como se mencionó anteriormente se tendrán en cuenta simulaciones meso con un tamaño de 51.1 km x 51.6 km y simulaciones micro con un tamaño de 15.7 km x 15.5 km.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar el potencial del recurso eólico en Valledupar, Colombia, por medio de simulaciones a diferentes escalas.

Objetivos Específicos

- Definir las escalas meso y micro para las simulaciones a partir de la topografía de Valledupar.
- Construir los modelos computacionales en CFD para las simulaciones meso y micro.
- Ejecutar los modelos computacionales construidos.
- Validar los resultados teniendo en cuenta los datos reales de la estación meteorológica ubicada en el aeropuerto internacional Alfonso López Pumarejo-Valledupar.

1. MARCO TEORICO

1.1. Fundamentos de la energía eólica

1.1.1. Introducción al Potencial Eólico

Según el autor J. F. Manwell. El surgimiento de la energía eólica como una fuente significativa de energía a nivel mundial es uno de los avances más importantes del siglo XX. Durante la era de la industrialización, con la aparición de la máquina de vapor y otras tecnologías basadas en combustibles fósiles parecía que el papel del viento en la generación de energía había quedado relegado a la irrelevancia. Sin embargo, a partir de finales de los años 60, y con mayor fuerza, en la década de los 90, se inició un cambio en la industria eólica, con un aumento significativo en la capacidad instalada y la adopción de aerogeneradores de gran tamaño [5].

Este resurgimiento fue impulsado por varios factores clave: la necesidad de energías alternativas sostenibles debido al agotamiento de los combustibles fósiles y sus efectos adversos, el potencial energético del viento y los avances tecnológicos que permitieron mejorar la eficiencia de las turbinas. Sin embargo, estos factores no habrían sido suficientes sin una visión clara y la voluntad política para apoyar la investigación [5].

De acuerdo con el autor J. F. Manwell, el desarrollo y la integración de la energía eólica en las redes eléctricas de gran tamaño como en los Estados Unidos, Dinamarca y Alemania fomentarían aún más el movimiento a favor de la industria eólica. Dando como resultado una rápida expansión de la energía eólica, que ha continuado creciendo en el siglo XXI, impulsada por políticas gubernamentales y promoviendo la conciencia de la necesidad de fuentes de energía limpias y sostenibles [5].

Basado en la página web “Iberdrola”. La energía eólica es aquella forma de generar energía eléctrica por medio de la fuerza del viento, gracias al uso de aerogeneradores que son las máquinas capaces de transformar la energía proveniente del viento (energía cinética) en electricidad gracias a que el viento hace contacto con las aspas de un rotor lo cual hace que este gire permitiendo la rotación del generador acoplado a este [6].

Figura 1

Energía Eólica

Nota. La figura muestra un aerogenerador cuyo rotor está orientado hacia la dirección del viento, el cual hace contacto con las palas y permite que el generador entre en funcionamiento. Tomado de:Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. [En línea] https://ee.tlu.edu.vn/Portals/0/2018/NLG/Sach_Tieng_Anh.pdf

Según lo expuesto por el autor Joaquín Mur, para generar energía eólica hace falta analizar diferentes parámetros para que la obtención de esta energía sea óptima, estos pueden ser establecer la posición más favorable del aerogenerador con respecto a la dirección del viento, estimar la producción energética para una ubicación, diseñar un sistema, determinar la velocidad del viento y la temperatura de la zona a instalar, entre otros [7].

1.1.2. El Viento: Parámetro Clave en la Energía Eólica

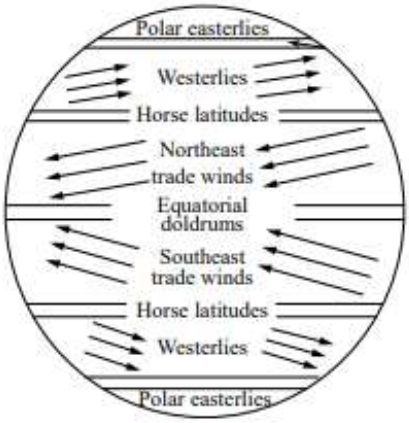
Como menciona el autor J. F. Manwell. Uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta para la producción de la energía eólica es el viento y su velocidad. La energía que impulsa los vientos proviene del sol, y es el resultado de diferencias de presión a lo largo de la superficie terrestre, causadas por la distribución desigual de la radiación solar [5].

La radiación solar absorbida en la superficie terrestre es mayor en el ecuador que en los polos, lo que provoca la formación de células convectivas en la troposfera, la capa inferior de la atmósfera [5].

Siguiendo el razonamiento de J. F. Manwell. En un modelo de flujo simplificado, el aire caliente asciende en el ecuador y desciende en los polos, generando la circulación atmosférica. Además, la rotación de la Tierra, con una velocidad aproximada de 1670 kilómetros por hora en el ecuador, y las variaciones estacionales en la distribución de la energía solar también influyen en esta circulación [5].

Figura 2

Vientos Globales



Nota: *La imagen muestra el esquema de los vientos globales en la Tierra, dividiéndolos en diferentes zonas de circulación atmosférica. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. [En línea]* *https://ee.tlu.edu.vn/Portals/0/2018/NLG/Sach_Tieng_Anh.pdf*

Como se ve en la imagen podemos dividir los vientos en:

- **Polares (Polar Easterlies):** Estas son las zonas en los polos (Norte y Sur) donde se generan vientos conocidos como *vientos polares del este*. Estos vientos soplan de este a oeste debido a la rotación de la Tierra y la baja presión en la región ecuatorial.
- **Vientos del Oeste (Westerlies):** Entre los 30° y 60° de latitud en ambos hemisferios, predominan los *vientos del oeste*, que soplan de oeste a este. Estos vientos son fundamentales para el clima de las latitudes medias.

- **Latitudes de los Caballos (Horse Latitudes):** Estas zonas se encuentran alrededor de los 30° de latitud en ambos hemisferios. Son áreas de alta presión y baja actividad de viento. Tradicionalmente, son conocidas por la calma de los vientos y se consideran zonas de transición entre los vientos alisios y los westerlies.
- **Vientos Alisios (Trade Winds):** En las zonas tropicales, entre los 0° y 30° de latitud, tenemos los *vientos alisios*, que soplan desde el noreste en el hemisferio norte y desde el sureste en el hemisferio sur, convergiendo hacia el ecuador.
- **Calma Ecuatorial o Doldrums (Equatorial Doldrums):** En el ecuador, alrededor de los 0° de latitud, se encuentran los *doldrums*, una zona de baja presión donde los vientos son débiles y variables. Esta es una región de intensa actividad de nubes y lluvias, debido al calentamiento del aire que asciende en la zona intertropical.

Como señala J. F. Manwell. Cada una de estas zonas está influenciada por la rotación de la Tierra y por el efecto Coriolis, que desvía el movimiento del aire, creando los patrones de vientos que se observan en la imagen. Estos vientos son fundamentales en la circulación global del aire, afectando el clima y las condiciones atmosféricas en diferentes partes del mundo [5].

1.1.3. Distribución De Weibull

Según lo indicado por Gary L. Johnson, la distribución de Weibull es una función de densidad de probabilidad ampliamente utilizada para modelar la distribución de las velocidades del viento, debido a su flexibilidad y capacidad para ajustarse a diferentes patrones de variabilidad del viento [8].

Se emplea particularmente en la evaluación del potencial eólico, ya que permite representar la frecuencia de ocurrencia de distintas velocidades de viento en un lugar determinado, lo que es fundamental para la planificación de proyectos de energía eólica [8].

La función de densidad de probabilidad para la distribución de Weibull está dada por:

Ecuación 1.

Distribución de Weibull

$$f(v) = \frac{k}{c} * (\frac{v}{c})^{k-1} * e^{-(\frac{v}{c})^k}$$

Donde:

v : velocidad del viento.

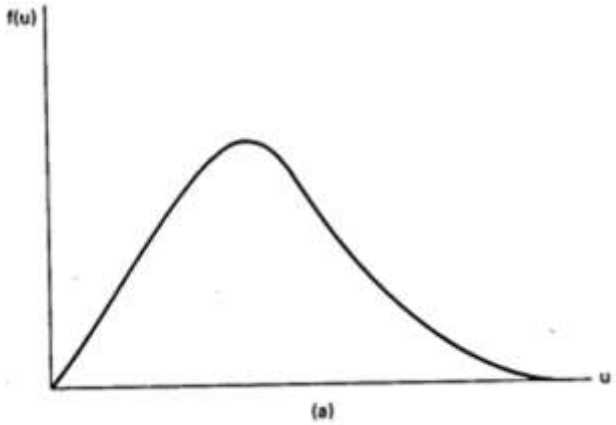
k: el parámetro de forma.

c: es el parámetro de escala.

Y se representa de la siguiente forma la función:

Figura 3

Distribución de Weibull Normal



Nota: *La imagen representa la función de densidad de probabilidad de Weibull para la velocidad del viento, que se denota como $f(v)$. Tomado de: Wind energy systems. [En Línea] https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=089f05a848d99e2e811606008d3c02c2c24ac828*

1.2. Principios esenciales de la dinámica de fluidos y simulación por computadora

1.2.1. Dinámica de fluidos computacional (CFD)

Según lo expuesto en la página web “Ansys”.La dinámica de fluidos computacional o *Computational fluid dinámics* (CFD) es la ciencia que hace uso de las computadoras para predecir, analizar y comprender el comportamiento de fluidos líquidos y gaseosos basándose en las ecuaciones de Navier Stokes (conservación de masa, momento y energía) [9].

1.2.2. Ecuaciones de Gobierno

Conforme lo plantea el autor M. H. Zawawi, las ecuaciones de gobierno son las ecuaciones que describen los fenómenos físicos de un fluido (líquido o gaseoso) como la masa, el momento y la energía. Al implementar estas ecuaciones dentro de un software de simulación se busca poder aproximarse al comportamiento del fluido en condiciones reales [10].

1.2.2.a. Ecuación de conservación de la masa. Según la argumentación de M. Dasilva. La ecuación de conservación de la masa o mejor conocido como ecuación de continuidad es la encargada de permitir que la masa del fluido que entra en el volumen de control sea la misma que la que sale partiendo de su posición según el tiempo transcurrido, permitiendo que durante el desarrollo de la simulación esta actue de la forma más realista posible tomando en cuentas los 3 componentes vectoriales que se manejan en las simulaciones (x,y,z) [11].

Ecuación 2.

Ecuación de conservación de la masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

Donde:

ρ: Densidad del fluido

t: Tiempo

u: Componente de velocidad en x

v: Componente de velocidad en y

w: Componente de velocidad en z

1.2.2.b. Ecuación de Conservación de Momentum. También conocida como ecuación de movimiento linear, a juicio de M. Dasilva, es aquella ecuación que permite aplicar la segunda ley de newton a la simulación dentro del volumen de control partiendo de los vectores x, y, z tomando en cuenta el tiempo transcurrido y la viscosidad permitiendo que el fluido tenga un desarrollo realista a lo largo de la simulación [11].

Ecuación 3. Ecuación de conservación de momentum

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho uw)}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{Re}\left[\frac{\partial\tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial z}\right]$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho vw)}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{1}{Re}\left[\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial z}\right]$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uw)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vw)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{1}{Re}\left[\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{zy}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z}\right]$$

Donde:

ρ: Densidad del fluido

t: Tiempo

p: Presión

u: Componente de velocidad en x

v: Componente de velocidad en y

w: Componente de velocidad en z

Re: Número de Reynolds

τ: Esfuerzo cortante

1.2.3. Modelo de Discretización

A partir de lo expuesto en la página web “Cadence”. Las ecuaciones de gobierno son ecuaciones diferenciales parciales, las cuales para ser solucionadas requieren de un método capaz de dar respuesta en cada punto del dominio computacional designado, a través de su ubicación en relación con el tiempo transcurrido en la simulación [12].

1.2.3.a. Volúmenes Finitos. En concordancia con Juan Osses, uno de los métodos más empleados en las simulaciones CFD es el Método de Volúmenes Finitos (FVM, por sus siglas en inglés), que ha ganado preferencia entre ingenieros y científicos. Siguiendo la línea de Juan Osses. Esto se debe a su robustez al abordar simulaciones complejas, especialmente en escenarios con flujos turbulentos. En tales casos, el Método de Elementos Finitos (FEM) suele enfrentar limitaciones significativas y no arroja los mejores resultados, lo que obliga a recurrir al Método de Volúmenes Finitos para garantizar una mayor precisión y estabilidad en los resultados obtenidos [13].

Los pasos que realiza el modelo son los siguientes:

1. Descomponer el dominio en volúmenes de control
2. Formular las ecuaciones integrales de conservación para cada volumen de control
3. Aproximar numéricamente las integrales
4. Aproximar los valores de las variables en las caras y las derivadas con la información de las variables nodales
5. Ensamblar y resolver el sistema algebraico obtenido [13].

1.2.4. Algoritmos de Solución

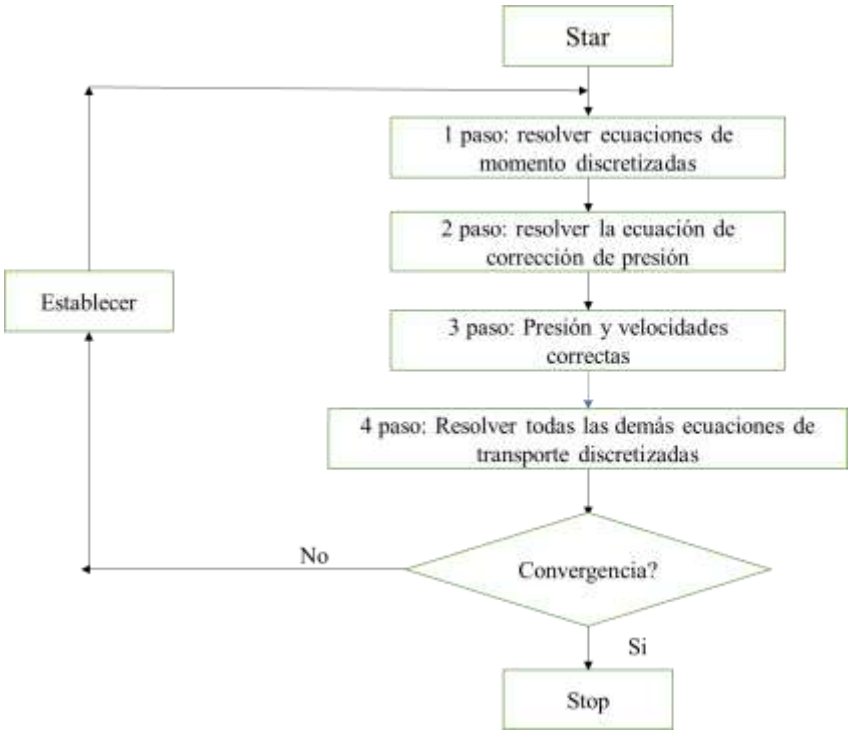
Con base en la página web “Byjus”. Para que las simulaciones sean resueltas se necesitan algoritmos de solución que permiten resolver las ecuaciones algebraicas implementadas con el fin de conocer el valor de las variables, ya sean velocidad, presión, densidad o temperatura [14].

1.2.4.a. SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Como señala A. F. Murcia Pabón. Uno de los algoritmos de solución de las ecuaciones de Navier Stock es el algoritmo SIMPLE que, según sus siglas en inglés, es un método semi – implícito para las ecuaciones de presión. El procedimiento de este algoritmo consiste

en derivar las ecuaciones de momentum y continuidad respecto a la presión, para luego corregir la velocidad y asegurar que se cumplan ambas ecuaciones [15].

Figura 4

Diagrama de Flujo del Algoritmo SIMPLE

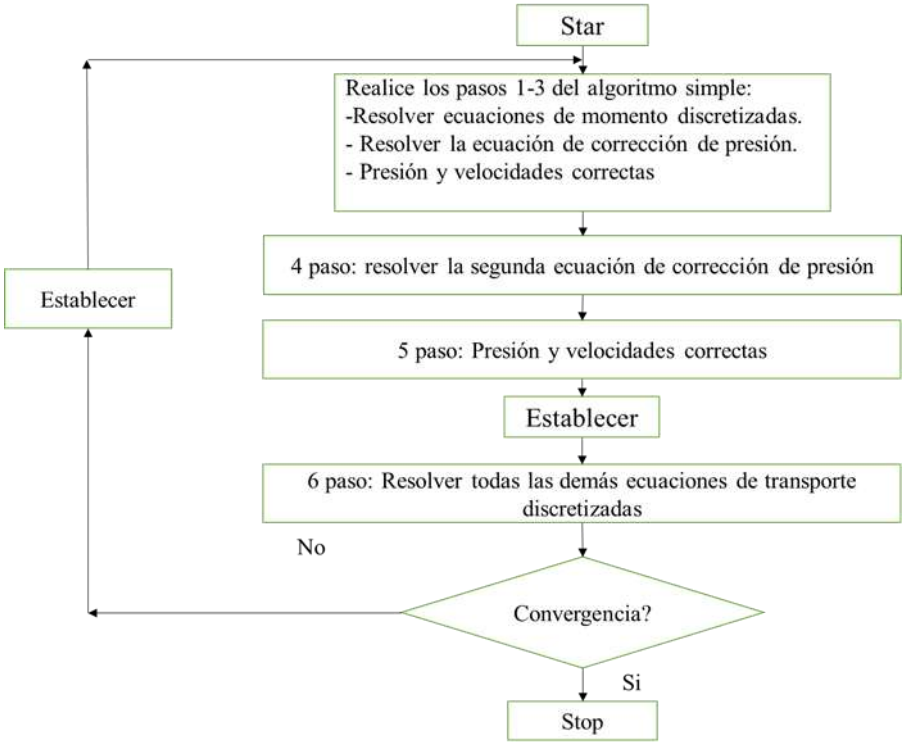


Nota. El diagrama muestra los pasos y proceso que realiza el algoritmo solucionador SIMPLE. Tomado de S.T Malaver y D.F Silva Simulación Del Rendimiento De Una Turbina Eólica Vertical-Helicoidal Darrieus En Ambientes Urbanos. [En Línea]. Disponible: https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/9168/1/4172299-2023-1-IM.pdf

1.2.4.b. PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators). A partir de lo expuesto en la página web “CDF online”, el algoritmo PISO corresponde a la realización de un cálculo de presión- velocidad, al igual que en el algoritmo SIMPLE, solamente que este algoritmo añade un paso de predicción y dos de corrección, prácticamente se considera una extensión del algoritmo SIMPLE [16].

Figura 5

Diagrama de Flujo del Algoritmo PISO



Nota. El diagrama muestra los pasos y proceso que realiza el algoritmo solucionador PISO. Tomado de S.T Malaver y D.F Silva Simulación Del Rendimiento De Una Turbina Eólica Vertical-Helicoidal Darrieus En Ambientes Urbanos. [En Línea]. Disponible: https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/9168/1/4172299-2023-1-IM.pdf

1.2.4.c. COUPLE. Conforme al juicio de A. F. Murcia Pabón. Este algoritmo se recomienda para simulaciones con flujos estables, y casos de estados transitorios con mallas deficientes, ya que este algoritmo se centra en resolver las ecuaciones de momentum y realizar las correcciones de la presión de manera independiente, logrando que la convergencia se logre de manera más lenta [15].

1.2.5. Modelos de Turbulencia

Siguiendo el razonamiento de G. Richmond. Al trabajar con simulaciones 3D se debe tener en cuenta que los fluidos tienden a tener un comportamiento turbulento debido a los altos número de reynols que se manejan y por ende se vuelve necesario tener un

modelo de turbulencia que permita solucionar las ecuaciones de masa y momentum para lograr resultados cercanos a los de la realidad [17].

1.2.5.a. Modelo k-ε. Tal como sostiene G. Richmond. El modelo k- ε es ampliamente utilizado en la industria, donde las simulaciones presentan altos valores de turbulencia y valores no tan altos del gradiente de presión.

Este modelo se centra en solucionar las ecuaciones adicionales.

- Energía cinética (k): definir la energía presente en la turbulencia
- Disipación de la energía cinética (ε): determinar la escala de la turbulencia.

Este modelo es recomendado para estudios estacionarios o dependientes del tiempo [17].

1.2.5.b. Modelo k-ω. A juicio de G. Richmond. Este modelo es bastante similar al modelo k-ε solo que este modelo resuelve la tasa específica de disipación de energía cinética (ω). Se usa para simulaciones de bajos y altos reynols pero se recomienda para reynols bajos [17].

Es un modelo no-lineal por lo cual va a ser más complicado que se llegue a la convergencia y los resultados a obtener dependen fuertemente del valor inicial.

Se recomienda hacer uso de este modelo de turbulencia para casos de recirculación, flujos con mucha curvatura, flujos internos y cercanos a paredes sólidas [17].

1.2.5.c. Modelo k- ω transition (SST). Desde la óptica de G. Richmond. Las siglas SST significan (Shear-Stress Transport), este modelo combina lo mejor de los modelos k-ε y k-ω, aplicando k-ε en zonas donde hay corriente libre y k- ω en las zonas cercanas a paredes. Sin embargo, este modelo depende de la distancia a la pared más cercana, por lo que se adiciona una ecuación para calcular dicha distancia. También este modelo se puede usar para reynol altos y bajos [17].

Al aplicar los dos modelos en una sola simulación se aumenta el recurso computacional necesario para obtener resultados óptimos [17].

1.2.5.d. Large-Eddy Simulation (LES). En relación con la página web “SIMSCALE”. El modelo LES o conocido como modelo de simulación de grandes Remolinos es un

modelo de turbulencia un poco más avanzado que los mencionados anteriormente, debido a que este modelo trata de estar en constante equilibrio entre calidad de datos y costo computacional, todo partiendo del tamaño de los remolinos producidos durante la simulación [18].

Según lo indicado en la página web “SIMSCALE”. Este modelo prioriza los remolinos de grandes tamaños que son producidos al contacto entre el fluido y la superficie, en cambio los remolinos de menor tamaño (más pequeños que la malla computacional) se les realiza un sub escalado de malla ya que se les considera universales y de esta forma gastar menos recursos [18].

Se recomienda el uso de este modelo para dominios de gran tamaño, que cuenten con grandes remolinos de turbulencia y que manejen flujo poco predecible, transitorio y/o turbulento [18].

2. METODOLOGÍA Y DATOS

Para realizar una simulación CFD se debe comenzar por definir los objetivos del estudio, en el caso de este proyecto se cuenta con los objetivos del capítulo anterior, identificando qué aspectos del flujo del viento se desean analizar. En el proyecto a presentar se busca conocer la velocidad del viento en un punto en específico ubicado en el centro de la simulación para luego validar sus resultados comparándolos con los datos de la estación meteorológica de Valledupar (aeropuerto Alfonso López Pumarejo) y corroborar si la información obtenida se asemeja a los datos reales.

Para poder cumplir con el objetivo del proyecto es necesario cumplir con 4 fases que se dividen en las siguientes:

- Definir las escalas Meso y Micro a partir de la topografía de Valledupar
- Construir los modelos computacionales para las simulaciones Meso y Micro
- Ejecutar las simulaciones con sus respectivos modelos computacionales
- Validar los resultados con los datos de la estación meteorológica de Valledupar

Para la fase 1 se optará por la obtención de datos topográficos por medio de softwares que permitan la extracción de la información en un modelo 3D mediante imágenes satelitales de la región de interés y se creará un modelo geométrico preciso de la topografía en un software CAD, que se utilizará como base para la simulación.

En el caso de la fase 2, se preparará una malla computacional que dividirá el dominio en celdas pequeñas que permiten una mayor precisión en áreas críticas, como los son los picos de las montañas. Se asignarán propiedades físicas a las simulaciones, como las condiciones de contorno del viento (velocidad, dirección), propiedades del aire (densidad, viscosidad) y adicional las condiciones de frontera en el modelo CAD construido. Con esta información, se seleccionará y configurará el modelo CFD, eligiendo el software adecuado y ajustando el algoritmo solucionador y los modelos de turbulencia.

Referente a la ejecución de las simulaciones o fase 3 se efectuará las simulaciones con los parámetros mencionados en la fase 2 para calcular la interacción del viento con la topografía en el punto deseado, lo que puede tomar tiempo dependiendo de la complejidad del caso.

Y para dar cierre a la fase 4, los resultados obtenidos deberán verificarse y validarse comparándolos con datos reales, para garantizar su fiabilidad. Finalmente, se analizarán y visualizarán los resultados mediante gráficos y tablas de resultados, documentando los hallazgos y conclusiones del análisis.

Para mayor comprensión de la metodología a aplicar en este proyecto se puede hacer referencia a la figura 1, la cual muestra de manera más organizada las etapas del proyecto junto con sus fases.

Figura 6

Diagrama de flujo de la metodología

Nota. La figura muestra mediante un diagrama de flujo cuales van a ser los procedimientos y fases a llevar a cabo durante el proyecto para completar los objetivos estipulados.

2.1. Fase 1: Definir las escalas Meso y Micro a partir de la topografía de Valledupar

El requisito principal para realizar una simulación tipo CFD es tener establecido un dominio computacional, (en este caso van a ser dos dominios, uno meso y uno micro) donde se van a encontrar la geometría y el fluido a estudiar.

2.1.1. Dominio computacional

Para la creación tanto del dominio meso como del dominio micro se hizo uso de un aplicativo web llamado map2STL el cual permite obtener un modelado 3D de la topografía de cualquier lugar con ayuda de Google Maps, permitiendo así tener un modelado a escala de la zona que se desea estudiar, en caso de este proyecto es la zona de Valledupar, Colombia.

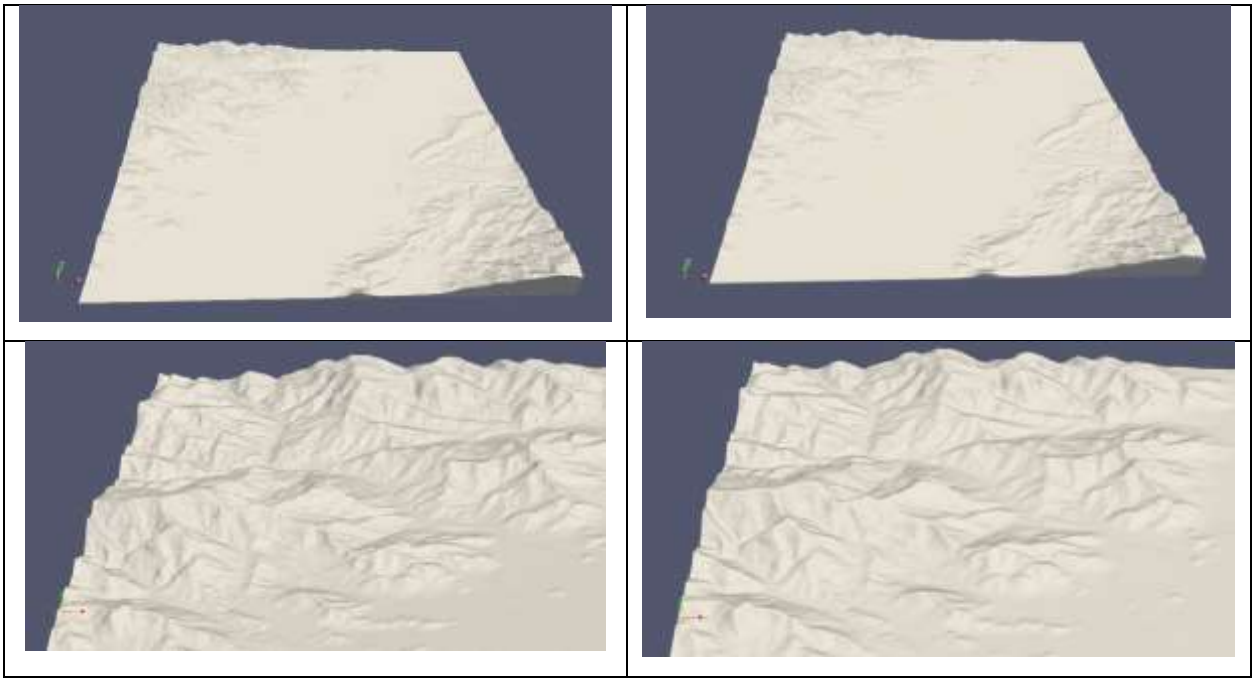
Cabe mencionar que en el centro de tanto el dominio meso como el dominio micro se encuentra la estación meteorológica del aeropuerto Alfonso Lopez Pumarejo, el cual va a servir como punto de validación.

Las dimensiones del domino meso son de 51.1 km x 51.6 km y las del dominio micro son de 15.7 km x 15.5 km.

A partir de los archivos en formato STL obtenidos para la región de Valledupar en el dominio meso, se hizo un escalado y suavizado de la topografía obtenida por medio del software Blender. Esto con el fin de que la malla computacional genere elementos más finos sobre la superficie de la topografía. Lo anterior se puede observar en las figuras de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Tabla 1

Suavizado de la topografía del dominio meso



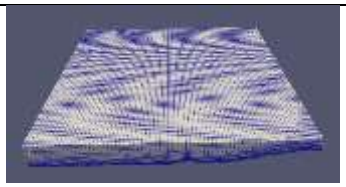
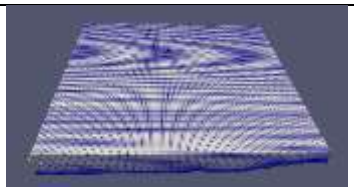
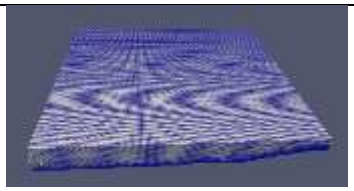
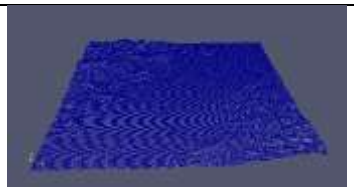
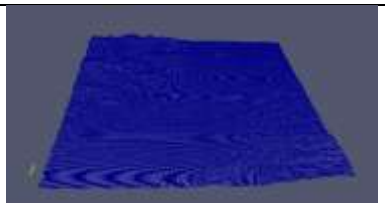
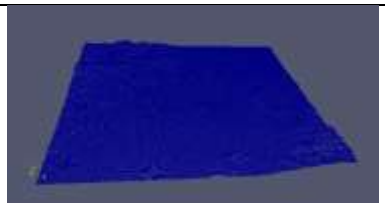
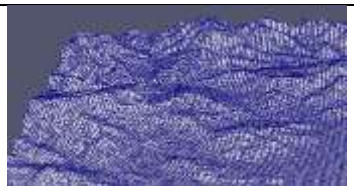
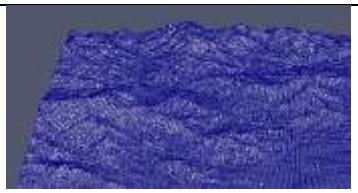
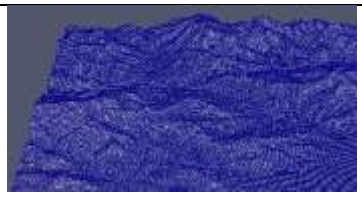
Nota. En las figuras a la izquierda se observa el dominio sin suavizado, a la derecha con suavizado. Las figuras en la parte inferior muestran un detalle de la esquina superior izquierda del dominio meso**.**

2.2. Fase 2: Construir los modelos computacionales para las simulaciones Meso y Micro

A partir de las topografías suavizadas se creó un dominio computacional de 5 km de altura para el dominio meso y de 1.5 km de altura para el dominio micro. Estos dominios se discretizaron con mallas tipo estructuradas y sucesivamente más refinadas. Se configuraron tres niveles de refinación para cada dominio, donde el primer nivel tiene 2.5 millones de elementos (2.5M), el segundo tiene 5 millones de elementos (5M) y el tercero tiene 10 millones de elementos (10M). Estos niveles se utilizarán para realizar el estudio de independencia de malla. En las figuras de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se pueden observar estos niveles de refinación de malla.

Tabla 2

Enmallado (discretización) del dominio meso para los tres niveles de refinamiento

2.5M	5M	10M
		
		
		

Nota. En la fila superior se ve el dominio completo discretizado. En la fila del medio se observa la discretización sobre la topografía del dominio meso. En la fila inferior se presenta el detalle de la discretización de la topografía en la esquina superior izquierda del dominio meso.

Figura 7

Configuración del enmallado

```
1 /*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*
2   =========                 |
3   \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4    \\    /   O peration     | Website:  https://openfoam.org
5     \\  /    A nd           | Version:  11
6      \\/     M anipulation  |
7 \*---------------------------------------------------------------------------*/
8 FoamFile
9 {
10     format      ascii;
11     class       dictionary;
12     object      snappyHexMeshDict;
13 }
14 // * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * /
15
16 // Which of the steps to run
17 castellatedMesh true;
18 snap            true;
19 addLayers       true;
20
21
22 // Geometry. Definition of all surfaces. All surfaces are of class
23 // searchableSurface.
24 // Surfaces are used
25 // - to specify refinement for any mesh cell intersecting it
26 // - to specify refinement for any mesh cell inside/outside/near
27 // - to 'snap' the mesh boundary to the surface
28 geometry
29 {
30     terrain
31     {
32         type triSurfaceMesh;
33         file "TopografiaValledupar1x2.stl";
34     }
35 };
36
37
38
39 // Settings for the castellatedMesh generation.
40 castellatedMeshControls
41 {
42
43     // Refinement parameters
44     // ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
45
46     // If local number of cells is >= maxLocalCells on any processor
47     // switches from from refinement followed by balancing
48     // (current method) to (weighted) balancing before refinement.
49     maxLocalCells 100000;
50
51     // Overall cell limit (approximately). Refinement will stop immediately
```

Nota. Esta sección del código muestra la configuración del enmallado que se va a realizar y de que archivo se va a tomar la geometría. De la línea de código 17 a 19 se solicita la creación de una malla (castellatedMesh) y la adición de capas limites (addLayers), desde la línea 20 a 35 precisa la geometría a la cual se le va a generar el enmallado. Y por último en la línea 39 a 51 se especifican los parámetros de la malla, resaltando el termino maxLocalCells que define la cantidad máxima de elementos en el enmallado.

El tamaño de los elementos más grandes es de 625 m para el nivel 2.5M, 440 m para el nivel 5M, y 320 m para el nivel 10M. El tamaño de los elementos más pequeños (sobre el terreno) es de 75 m para el nivel 2.5M, 54 m para el nivel 5M, y 40m para el nivel 10M.

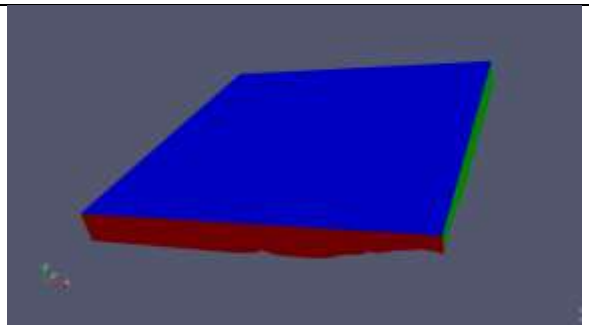
2.2.1. Condiciones de Frontera

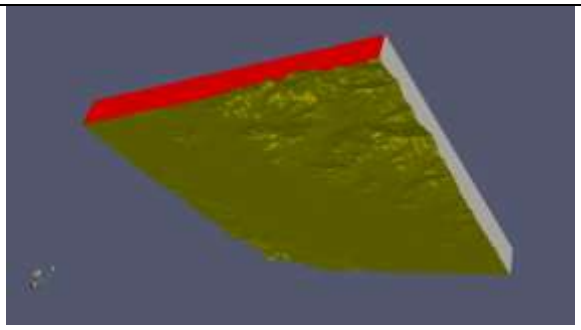
Se establecieron cinco condiciones de frontera del dominio meso, las cuales se muestran en las figuras de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** sobre el dominio.

- *Inlet*: Para la velocidad de entrada en el dominio meso se establecieron tres velocidades del viento tomadas del Atlas de vientos de Colombia [19]. Estas velocidades son el promedio multianual a 80 m de altura (10.55 m/s), el promedio multianual para el mes con menor velocidad del viento a 80 m de altura (7.22 m/s para los meses de septiembre y octubre), y el promedio multianual para el mes con mayor velocidad del viento a 80 m de altura (13.23 m/s para el mes de enero). Como señala R. Li, estas velocidades se configuran con un perfil de capa límite logarítmico con un coeficiente de rugosidad de 0.4, el cual corresponde a bosques densos, casas y suburbios [20]. A partir de la información del Atlas de vientos de Colombia se establece que la dirección predominante del viento es de este a oeste. La presión se establece con gradiente cero en esta frontera [19].
- *outlet:* para la condición de frontera de salida se estable una configuración de velocidad entrada-salida, la cual permite al software calcular libremente la velocidad con base en los valores internos del dominio. La presión se establece como atmosférica.
- *terrain:* para la condición de frontera de la superficie del terreno se establece una condición de no deslizamiento para la velocidad (0 m/s), y gradiente cero para la presión.
- *sides:* para la condición de frontera de las caras laterales del dominio se establece una configuración deslizante para la velocidad y la presión.
- *top:* para la condición de frontera de la cara superior del dominio se establece una configuración deslizante para la velocidad y la presión.

Tabla 3

Fronteras definidas en el dominio



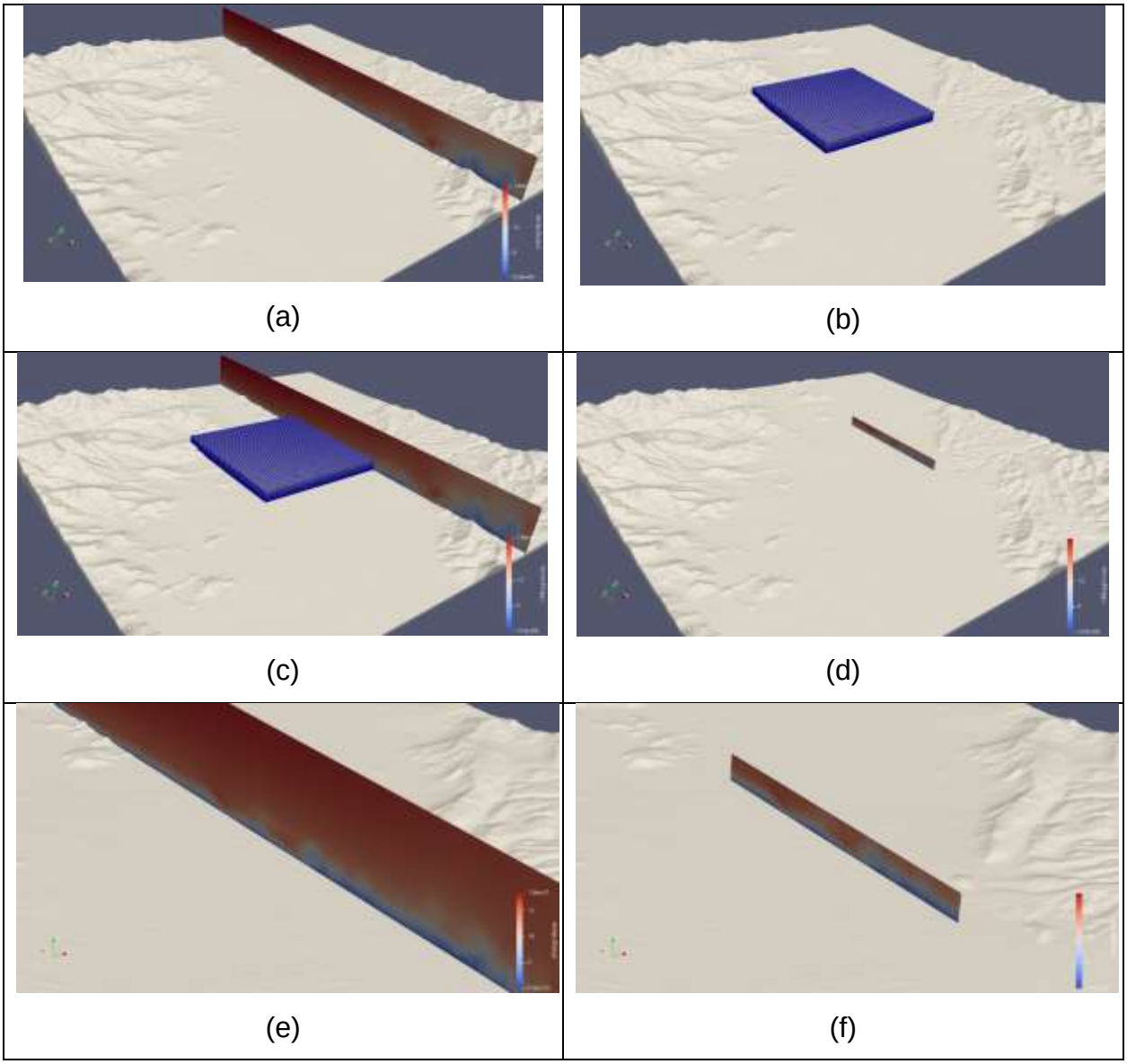


Nota. Cada frontera se identifica con un color los cuales son inlet (verde), outlet (gris), terrain (amarillo), sides (rojo) y top (azul).

Para el dominio micro se utilizan la misma configuración de las condiciones de frontera del dominio meso para *outlet, terrain, sides* y *top*. Para la frontera *inlet* se realiza un mapeo de las variables de velocidad, presión y turbulencia desde un corte transversal en el dominio meso hacia esta frontera en el dominio micro. Esto se realiza una vez la simulación del dominio meso ha terminado y se establece como condición inicial en el dominio micro, logrando así la continuidad del comportamiento del flujo entre las simulaciones de ambos dominios. En las figuras de la Tabla 4 se puede observar el corte transversal realizado al dominio meso y el mapeo de los valores a la condición de frontera *inlet* del dominio micro.

Tabla 4

Mapeo para la condición de frontera inlet del dominio micro



Nota. En la figura (a) se observa el corte transversal realizado al dominio meso una vez finalizada la simulación de este, se muestran en color los valores de la magnitud de la velocidad (se muestra la topografía del terreno en blanco como referencia). En la figura (b) se presenta el dominio micro (enmallado en azul) sobre impuesto sobre la topografía. En la figura (c) se puede observar la alineación del corte transversal del dominio meso con el dominio micro. En la figura (d) se presenta la frontera inlet del dominio micro con los valores de las propiedades (se presenta solo la magnitud de velocidad) mapeados. En las figuras (e) y (f) se presentan en acercamiento el corte transversal del dominio meso y la condición de frontera inlet del dominio micro, respectivamente.

2.2.2. Características del Fluido

Se utilizó aire estándar simulado como gas ideal. Se configuró el valor de la densidad promedio de 1.15 kg/m³, obtenida del Atlas de vientos de Colombia [19].

2.2.3. Parámetros Numéricos y Algoritmo de Solución

Se estableció un solucionador basado en presión (PIMPLE) el cual asume el fluido como incompresible. Se desprecia el efecto de la gravedad sobre el comportamiento del flujo. El solucionador resuelve las ecuaciones de continuidad y de momentum, sin embargo, no se incluye las ecuaciones de energía debido a que los cambios de temperatura y entalpía en el fluido son insignificantes dada la baja velocidad en la simulación.

Figura 8

Configuración de algoritmo de solución

```
1 /*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
2   =========                 |
3   \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4    \\    /   O peration     | Website:  https://openfoam.org
5     \\  /    A nd           | Version:  11
6      \\/     M anipulation  |
7 \*---------------------------------------------------------------------------*/
8 FoamFile
9 {
10     format      ascii;
11     class       dictionary;
12     location    "system";
13     object      fvSchemes;
14 }
15 // * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //
16
17 ddtSchemes
18 {
19     default backward;
20 }
21
22 d2dt2Schemes
23 {
24 }
25
26 gradSchemes
27 {
28     default         Gauss linear;
29
30     grad(nuTilda)   cellLimited Gauss linear 1;
31     grad(U)         cellLimited Gauss linear 1;
32 }
33
34 divSchemes
35 {
36     default         none;
37
38     div(phi,U)      Gauss LUST unlimitedGrad(U);
39     div(phi,k)      Gauss limitedLinear 1;
40     div(phi,nuTilda) Gauss limitedLinear 1;
41
42     div((nuEff*dev2(T(grad(U))))) Gauss linear;
43 }
44
45 laplacianSchemes
46 {
47     default         Gauss linear limited corrected 0.33;
48 }
49
50 interpolationSchemes
51 {
```

Nota. Esta es la sección del código donde se configuran los lineamientos y esquemas de solución da la simulación. Desde la línea de código 17 hasta la línea 48 se define los esquemas que se van a usar para resolver las ecuaciones de gobiernos, por medio de un esquema de Euler inverso implícito, que es usado para problemas de flujo. Adicional se usan esquemas lineales de Gauss para tomar en cuenta las variables de viscosidad turbulenta (nuTilda) y Velocidad U y de esta forma poder obtener resultados precisos y estables.

Se configura un modelo de turbulencia LES. Para el desarrollo de la turbulencia en la simulación se establece que esta se realice de forma transiente, hasta que se alcance una estabilidad en los resultados de la velocidad medidos en el punto donde se ubica la estación meteorológica del Aeropuerto Alfonso López de Valledupar.

Figura 9

Configuración modelo de turbulencia

```
1  /*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
2    =========                 |
3    \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4     \\    /   O peration     | Website:  https://openfoam.org
5      \\  /    A nd           | Version:  11
6       \\/     M anipulation  |
7  \*---------------------------------------------------------------------------*/
8  FoamFile
9  {
10     format      ascii;
11     class       dictionary;
12     location    "constant";
13     object      momentumTransport;
14 }
15 // * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //
16
17 simulationType  LES;
18
19 LES
20 {
21     model               SpalartAllmarasDDES;
22
23     delta               cubeRootVol;
24
25     printCoeffs         on;
26
27     turbulence          on;
28
29     cubeRootVolCoeffs
30     {
31         deltaCoeff      1;
32     }
33
34     PrandtlCoeffs
35     {
36         delta           cubeRootVol;
37         cubeRootVolCoeffs
38         {
39             deltaCoeff      1;
40         }
41         smoothCoeffs
42         {
43             delta           cubeRootVol;
44             cubeRootVolCoeffs
45             {
46                 deltaCoeff      1;
47             }
48             maxDeltaRatio   1.1;
49         }
50         Cdelta           0.158;
```

Nota. Esta es la sección del código donde se configura el modelo de turbulencia a usar. En la línea 17 se nombra que clase de modelo de turbulencia se va a usar en al simulación, en el caso de este proyecto fue LES (Large Eddy Simulation) y desde la línea 22 hasta la 51 es donde se definen los parámetros del modelo como delta (longitud de la estructura turbulenta), PrandtlCoeffs (coeficiente de difusion turbulenta) y smoothCoeffs (coeficiente de suavización de variables)

2.3. Fase 3: Ejecutar las simulaciones con sus respectivos modelos computacionales.

Las simulaciones se realizaron en un computador de alto desempeño con un procesador Intel X99 de 48 hilos y 64 GB de memoria RAM. Con base en la pagina web “Ideal Simulations”, se utiliza un paso de tiempo adaptativo buscando que la condición CFL (número de Courant) no supere el valor de 1 [21]. Las simulaciones del nivel 2.5M toman

alrededor de 4 horas en correr, las simulaciones del nivel 10M toman alrededor de 240 horas en correr.

2.4. Fase 4: Validar los resultados con los datos de la estación meteorológica de Valledupar.

Para completar esta fase es necesario tener los resultados de todas las simulaciones deseadas y los datos de validación que se encuentran disponibles en el alta de vientos de Colombia, lo cual se va a presentar en el siguiente capítulo.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

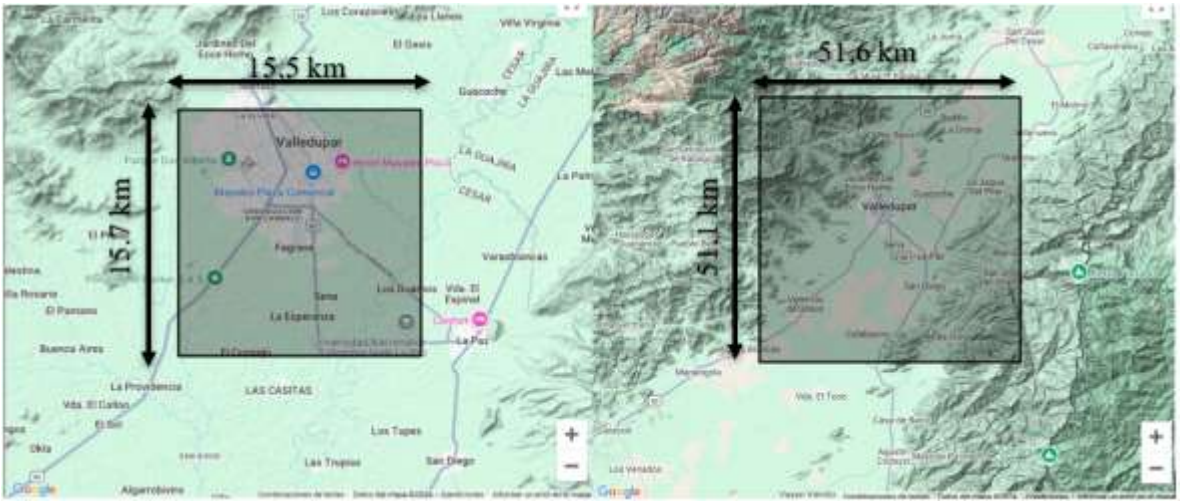
3.1. Definir las escalas meso y micro para las simulaciones a partir de la topografía de Valledupar

Para realizar cualquier tipo de simulación CFD es necesario contar con un dominio computacional, para el caso de este proyecto fueron necesarios 2 dominios computacionales, los cuales se definieron como escalas. La primera escala o escala meso se manejó con unas dimensiones de 51.6 km por 51.1 km como se puede ver en la figura 7, permitiendo abarcar grandes cantidades de terreno y captando gran parte de la topografía montañosa, lo cual favorece el buen desarrollo del fluido a través de la simulación.

En cuanto a la segunda escala o escala micro, se optó por trabajar con dimensiones de 15.5 km por 15.7 km como se evidencia en la figura 7, en dicha escala se presenta una topografía menos agresiva, predominando las planicies y centrándose más en el punto de validación ubicado en el centro de la escala o dominio.

Figura 10

Dominio Meso y Micro



Nota. En esta imagen se muestra las dimensiones a nivel micro(izquierdo) y meso (derecho) en las cuales se va a desarrollar el estudio

3.2. Construir los modelos computacionales en CFD para las simulaciones meso y micro

Cualquier simulación de tipo CFD necesita definir los modelos computacionales a trabajar y los algoritmos de solución que se van a tomar en cuenta durante la ejecución de las simulaciones. Para este proyecto se tomaron en cuenta las ecuaciones de conservación de la masa y ecuaciones de conservación de momentum, dichas ecuaciones posibilitan recrear los fenómenos físicos de la realidad en el programa de simulación, permitiendo que por medio de un algoritmo solucionador se simule el comportamiento del fluido a trabajar (en este caso el aire estándar como gas ideal) en un área limite conocida como dominio computacional.

El algoritmo solucionador usado en este proyecto es basado en presión llamado PIMPLE, el cual combina el algoritmo solucionador PISO y el algoritmo SIMPLE. Dicho solucionador asume que el fluido es incomprensible y no toma en cuenta el efecto de la gravedad sobre el flujo. También el solucionador, al momento de resolver las ecuaciones, descarta las ecuaciones de energía presentes debido a que los cambios de temperatura y la entalpia del fluido son despreciables debido a la baja velocidad presente en la simulación.

Se configuró un modelo de turbulencia LES por a su equilibrio en costo computacional y calidad de datos, adicionalmente se previó que debido a la topografía rocosa presente en la simulación se iban a generar remolinos de turbulencia de gran tamaño (los cuales son la prioridad y especialidad del modelo de turbulencia) resultando en la selección más apropiada del modelo de turbulencia a trabajar.

3.3. Ejecutar los modelos computacionales construidos

3.3.1. Análisis de independencia de malla

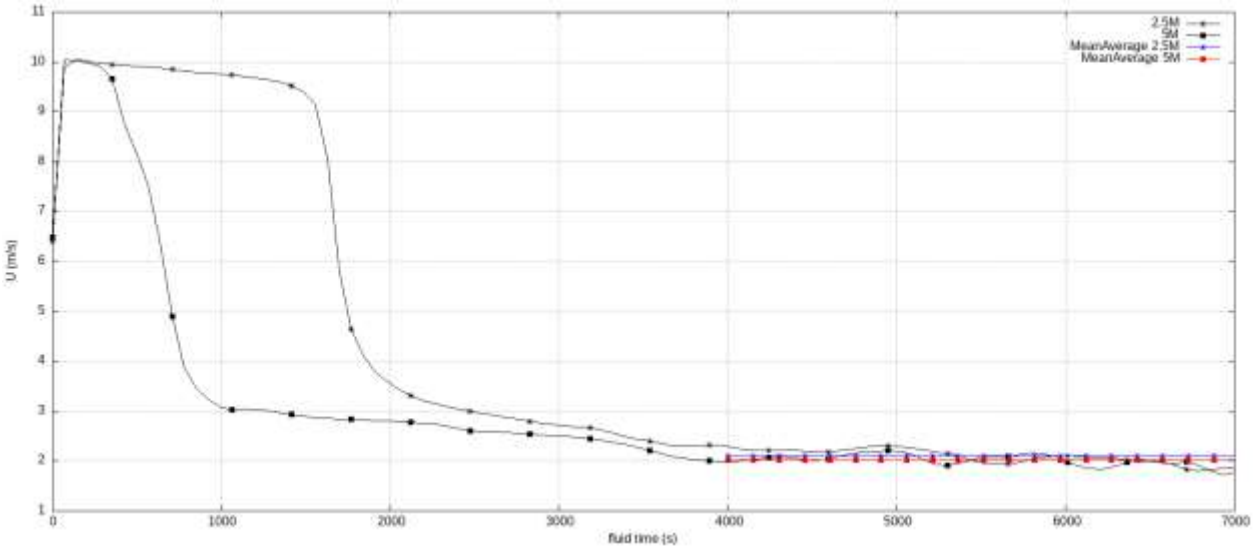
El análisis de independencia de malla se realizó en base a las 3 velocidades de entrada mencionadas en el capítulo anterior (13.23 m/s, 10.55 m/s y 7.22 m/s) por medio del software OpenFOAM-v2406 (programa el cual permite realizar simulaciones tipo CFD por medio de programación vía código C++) siendo el promedio multianual del mes con

mayor velocidad, promedio multianual de todos los meses y promedio multianual del mes con menor velocidad correspondientemente. Cabe resaltar que el análisis de independencia de malla se realizó tanto para la escala meso como para la escala micro.

3.3.1.a. Análisis Simulación Meso

Figura 11

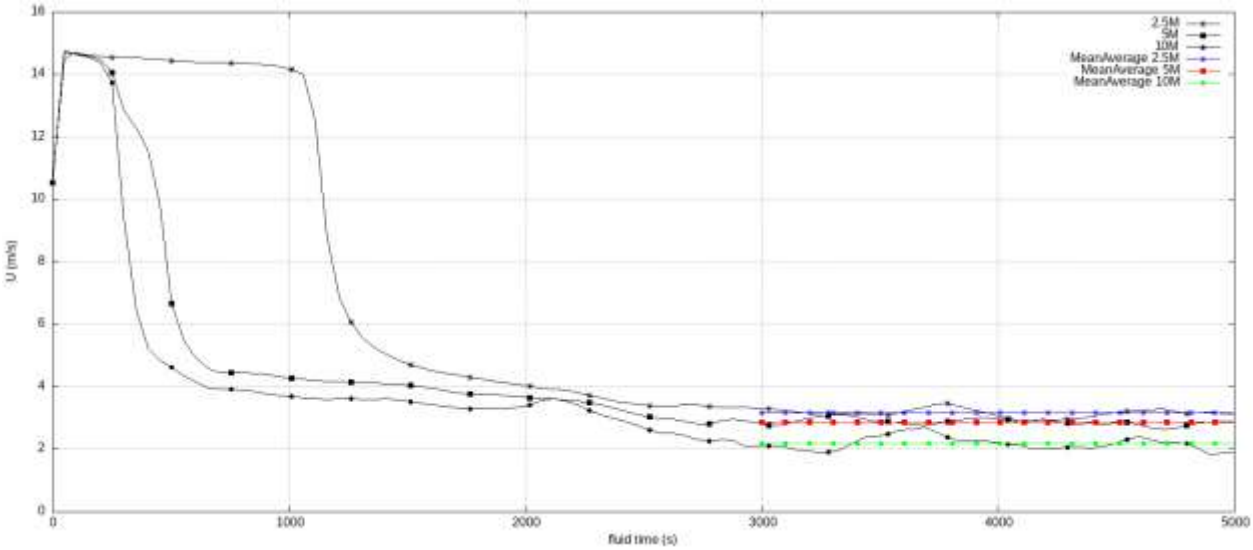
Resultados Simulación Meso con velocidad inicial de 7.22 m/s.



Nota. Se realiza una simulación con el algoritmo solucionador PIMPLE y el modelo de turbulencia LES, tomando como valor de entrada la velocidad de 7.22 m/s, en la gráfica se evidencia que la velocidad del fluido al llegar a los 4000 segundos de tiempo de fluido tiende a converger y da como resultado de la simulación una velocidad cercana a los 2 m/s en el centro del dominio. Dicho resultado se obtiene partiendo de un promedio de los resultados entre los 4000 y 7000 segundos de tiempo de fluido en las mallas de 2.5M y 5M.

Figura 12

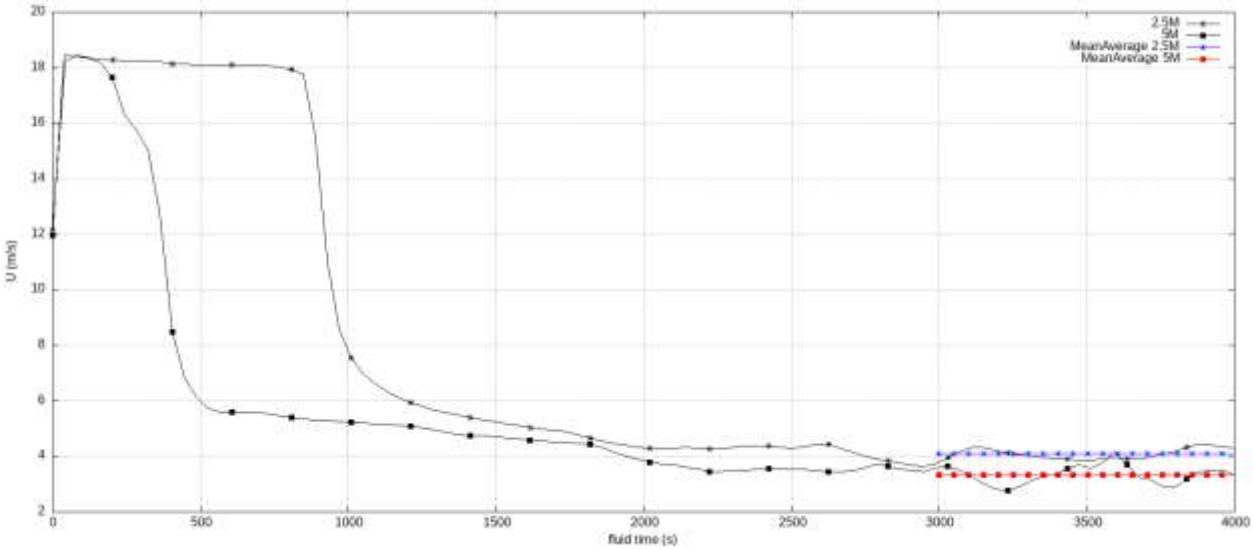
Resultados Simulación Meso con velocidad inicial de 10.55 m/s.



Nota. Se realiza una simulación con el algoritmo solucionador PIMPLE y el modelo de turbulencia LES, tomando como valor de entrada la velocidad de 10.55 m/s, en la gráfica se evidencia que la velocidad del fluido al llegar a los 3000 segundos de tiempo de fluido tiende a converger y da como resultado de la simulación una velocidad entre 2 m/s y 3 m/s en el centro del dominio. Dicho resultado se obtiene partiendo de un promedio de los resultados entre los 3000 y 5000 segundos en las mallas de 2.5M, 5M y 10M.

Figura 13

Resultados Simulación Meso con velocidad inicial de 13.23 m/s.

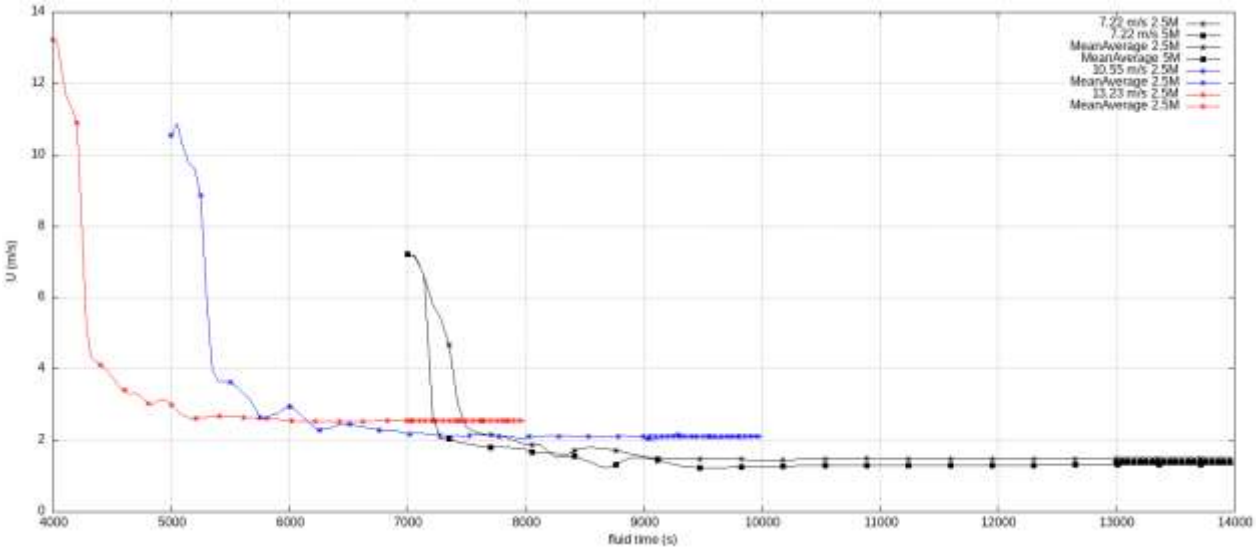


Nota. Se realiza una simulación con el algoritmo solucionador PIMPLE y el modelo de turbulencia LES, tomando como valor de entrada la velocidad de 13.23 m/s, en la gráfica se evidencia que la velocidad del fluido al llegar a los 3000 segundos de tiempo de fluido trata de converger y da como resultado de la simulación una velocidad entre 2 m/s y 3 m/s en el centro del dominio. Dicho resultado se obtiene partiendo de un promedio de los resultados entre los 3000 y 4000 segundos en las mallas de 2.5M y 5M.

3.3.1.b. Análisis Simulación Micro. Para las simulaciones micro se optó por realizar el análisis de independencia de malla solo de la malla de 2.5 millones de elementos debido a que al realizar la prueba con la malla de 5 millones de elementos los valores desvariaban demasiado del valor que se buscaba.

Figura 14

Resultados Simulación Micro con velocidades iniciales de 7.22 n/s, 10.55 m/s y 13.23 m/s



Nota. Se realiza una simulación con el algoritmo solucionador PIMPLE y el modelo de turbulencia LES, tomando como valores de entrada la velocidad de 7.22 m/s, 10.55 m/s y 13.23 m/s, En la gráfica se puede evidenciar los resultados de las simulaciones de distintas velocidades de entrada con 2.5 millones de elementos, para la velocidad inicial 7.22m/s converge entre los 13000 y 14000 segundos dando como resultado una velocidad inferior a los 2 m/s; en el caso de la velocidad inicial de 10.55m/s converge entre 9000 y 10000 segundos y da como resultado una velocidad cercana a los 2.5 metros sobre segundo. Y en el caso de la velocidad inicial de 13.23m/s este converge entre los 7000 y 8000 segundos y da como resultado una velocidad aproximada de 3m/s.

3.4. Validar los resultados teniendo en cuenta los datos reales de la estación meteorológica ubicada en el aeropuerto internacional Alfonso López Pumarejo-Valledupar

En este capítulo se procede a mostrar los resultados de las simulaciones teniendo en cuenta la velocidad de entrada (7,22 m/s, 10,55 m/s, y 13,23 m/s) y el refinamiento de la malla. Teniendo como resultado las velocidades dadas de las simulaciones en m/s contra los valores de validación tomado desde la literatura.

Tabla 5

Resultados de Simulaciones Meso

Resultados Simulaciones Meso						
Velocidad entrada (m/s)	7,22		10.55		13.23	
Malla (millones)	Velocidad simulación (m/s)	Porcentaje de error	Velocidad simulación (m/s)	Porcentaje de error	Velocidad simulación (m/s)	Porcentaje de error
2.5	2.09442	16.22%	3.16468	18.44%	4.08548	21.43%
5	2.01956	19.22%	2.87778	25.83%	3.33327	35.90%
10			2.19515	43.42%		
Valores Validación (m/s)	2.5		3.8		5.2	

Nota. En la tabla se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones meso con el porcentaje de error partiendo de los valores de validación obtenidos de literatura, en las mallas refinadas de 2.5, 5 y 10 millones de elementos

Se puede ver que en la figura 11 y 13 se realizaron simulaciones con un enmallado de 2.5 millones de elementos y 5 millones de elementos, en este caso no se realizaron simulaciones con 10 millones de elementos debido a que se encontró un patrón que al momento de refinar la malla el porcentaje de error aumentaba considerablemente, como se puede ver en la figuro 9 donde se presenta una simulación con un enmallado de 10

millones de elementos y una velocidad de entrada de 10.55m/s , velocidad la cual es el promedio multi anual de la estación meteorológica de Valledupar, al momento de calcular el porcentaje de error arrojo un resultado de 43.42% de error en comparación con los valores de validación tomados del altas de vientos de Colombia.

Esto se debe a diferentes factores, uno de ellos es porque las simulaciones tuvieron como datos de entrada promedios anuales de velocidades del viento, lo cual es incorrecto si se toma en cuenta que en un área específica se encuentra más de un valor diferente de velocidad de viento. Otro factor que afecto los resultados de las simulaciones fue que al tener un solo valor de entrada como velocidad del viento se capta de manera errónea la turbulencia encontrada dentro del dominio en las partes donde se tiene un aumento de nivel topográfico, lo que también se ve afectado por el aumento de velocidad como se puede ver en la tabla 5.

Tabla 6

Resultados Simulaciones Micro

Resultados Simulaciones Micro						
Velocidad entrada (m/s)	7,22		10.55		13.23	
Malla (millones)	Velocidad simulación (m/s)	Porcentaje de error	Velocidad simulación (m/s)	Porcentaje de error	Velocidad simulación (m/s)	Porcentaje de error
2.5	1,4853	40,59%	2,10314	45,80%	2,54367	51,08%
5	1,38029	44,79%				
10						
Valores Validación (m/s)	2.5		3.8		5.2	

Nota. En la tabla se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones micro con el porcentaje de error partiendo de los valores de validación obtenidos de literatura, en las mallas refinadas de 2.5, y 5 millones de elementos

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las simulaciones meso, en las cuales se encontraron valores con una tasa de error superior al 10%, se optó por utilizar los mismos valores de entrada de la simulación meso para evitar usar los resultados desfasados de esta como datos iniciales. Las simulaciones micro sirvieron para corroborar la teoría anteriormente mencionada, en la cual un mayor refinamiento (en este caso de malla y dominio), y el aumento de la velocidad del viento generaran un crecimiento considerable en el porcentaje de error acercándose al 50% como se muestra en la tabla 6.

Cabe resaltar que las simulaciones de 5 millones de elementos y 10 millones de elementos no se continuaron realizando por dos principales factores. Primero el tiempo de convergencia en las simulaciones estaba aumentando notablemente, pasando de simulaciones de aproximadamente uno a dos días a tardar más de dos semanas. Segundo, como se mencionó el porcentaje de error aumentaría hasta sobrepasar el 50% dando así datos inexactos lo cual se buscaba evitar en las simulaciones.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El uso del software OpenFOAM permite construir modelos computacionales que simulan de manera realista el comportamiento de un fluido, en este caso el aire. Estas simulaciones, basadas en promedios multianuales de velocidades de viento, replican de manera auténtica el comportamiento del viento bajo condiciones reales. En este proyecto se utilizaron velocidades promedio de 10.55 m/s, 7.22 m/s y 13.23 m/s obtenidas en la estación meteorológica Alfonso López Pumarejo, Valledupar.

La capacidad computacional adecuada permite observar el comportamiento del fluido a lo largo del dominio, reflejando con precisión la influencia de la topografía, como valles, montañas y desniveles. Las simulaciones realizadas abarcaron escalas meso (51.6 km x 51.1 km) y micro (15.5 km x 15.7 km), con resultados que reflejan fielmente las direcciones del viento descritas en el Atlas de Vientos de Colombia. Para garantizar simulaciones eficientes y precisas, se recomienda utilizar equipos con alta capacidad computacional que igualen o superen las especificaciones del utilizado en este proyecto.

Los datos obtenidos son coherentes con los parámetros y entradas iniciales, pero el uso de promedios multianuales limita la representación de los modelos de turbulencia, generando errores entre 16% y 44%. Esto implica desviaciones de entre 0.5 m/s y 2.4 m/s respecto a los valores de validación en la estación meteorológica. Por ello, es crucial diversificar las fuentes de datos utilizando atlas de vientos y otros recursos que ofrezcan datos más específicos (horarios, diarios, semanales, mensuales) para enriquecer las simulaciones.

Se observó un patrón en el que el refinamiento de la malla (de 2.5 a 5 millones de elementos y luego a 10 millones) incrementa el porcentaje de error respecto al valor de validación. Esto resulta contrario a lo esperado en simulaciones CFD, donde mallas más refinadas suelen mejorar la precisión. Este fenómeno resalta la importancia de analizar factores como las condiciones de frontera y los modelos de turbulencia, y se recomienda investigar distintos modelos de turbulencia para identificar aquellos que mejor se adapten al comportamiento del fluido y las condiciones del dominio.

La comparación entre las escalas meso y micro revela diferencias significativas en las tasas de error, con valores de entre 16.22% y 43.42% para la escala meso, y entre 40.59% y 51.08% para la escala micro. Esto subraya la necesidad de considerar cuidadosamente los modelos de turbulencia y las condiciones de frontera. Además, es fundamental trabajar con datos validados para comparar los resultados y aumentar la confiabilidad del proyecto. Adicionalmente, las simulaciones micro que utilizaron mallas con más de 5 millones de elementos no fueron incluidas debido a la alta demanda computacional.

Para llevar a cabo proyectos de este tipo, se recomienda contar con una base sólida en mecánica de fluidos, especialmente en modelos de turbulencia, y planificar un periodo de al menos un año para realizar simulaciones detalladas, validar resultados y efectuar las correcciones necesarias.

Finalmente, explorar otras herramientas CFD que puedan ser más adecuadas al tipo de simulación requerida es una estrategia importante. También resulta esencial consultar literatura especializada sobre simulaciones CFD, enfocándose en aspectos críticos como dominio computacional, condiciones de frontera, capa límite, modelos matemáticos y algoritmos de solución.

REFERENCIAS

[1] "La importancia de las energías renovables | ACCIONA | BUSINESS AS UNUSUAL". ACCIONA | BUSINESS AS UNUSUAL. línea]. Disponible: https://www.acciona.com/es/energias-renovables/?_adin=02021864894

[2] IDEAM-UPME, Atlas de Viento de Colombia, Bogotá: IDEAM-UPME, 2017.

[3] B. Xavier Becerra. "La demanda de energía aumentó 5,48% en febrero, impulsada por la región Caribe". Diario La República. [En línea]. Disponible: https://www.larepublica.co/economia/la-demanda-de-energia-aumento-5-48-en-febrero-impulsada-por-la-region-caribe-3823600

[4] "Así fue el análisis de la calidad del servicio de energía eléctrica en el Cesar – Cámara de Comercio de Valledupar para el Valle del Rio de Cesar". Cámara de Comercio de Valledupar para el Valle del Rio de Cesar – Unidos impulsamos el desarrollo de nuestra región. [En línea]. Disponible: https://ccvalledupar.org.co/asi-fue-el-analisis-de-la-calidad-del-servicio-de-energia-electrica-en-el-cesar/

[5] J. F. Manwell, A. L. Rogers y J. G. McGowan, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. Wiley Sons, Inc., John, 2009.

[6] Iberdrola. "¿Qué es la energía eólica, cómo se transforma en electricidad y cuáles son sus ventajas?" [En línea]. https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia-eolica.

[7] J. Mur Amada, *Curso de energía eólica*. Zaragoza: Dep. Ing. Electr. Univ. Zaragoza, 2001. [En línea]. Disponible: https://www.windygrid.org/manualEolico.pdf

[8] G. L. Johnson, *Wind energy systems*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall, 1985. En Línea].Disponible:https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=089f05a848d99e2e811606008d3c02c2c24ac828

[9] "What is Computational Fluid Dynamics (CFD)". ANSYS. [En línea]. Disponible: https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-computational-fluid-dynamics#:~:text=Computational%20fluid%20dynamics%20(CFD)%20is,mass,%20momentum,%20and%20energy

[10] M. H. Zawawi *et al.*, “A review: Fundamentals of computational fluid dynamics (CFD)”, en *GREEN DES. MANUFACTURE: ADV. EMERG. APPL.: Proc. 4th Int. Conf. Green Des. Manufacture 2018*, Ho Chi Minh, Vietnam. Author(s), 2018. Accedido el 30 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.1063/1.5066893

[11] M. Dasilva. “Navier-Stokes Equation | Glenn Research Center | NASA”. Glenn Research Center | NASA. [En línea]. Disponible: https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/navier-strokes-equation/

[12] “CFD Simulation Types: Discretization, Approximation, and Algorithms”. PCB Design & Analysis Resources | Cadence. [En línea]. Disponible: https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-cfd-simulation-types-discretization-approximation-and-algorithms

[13] J. Osses. “El método de volúmenes finitos”. ESSS. [En línea]. Disponible: https://www.esss.com/es/blog/el-metodo-de-volumenes-finitos/

[14] “Navier-Stokes Equation - Definition, Applications, Solutions FAQs”. BYJUS. [En línea]. Disponible: https://byjus.com/physics/navier-stokes-equation/

[15] “A. F. Murcia Pabón, “Modelamiento De Una Turbina Eólica Darrieus H De Eje Vertical Implementando El Método De Sliding Mesh Por Simulación CFD”, Trabajo de Grado, Univ. Am., Bogotá D.C, 2019. [En línea]. Disponible: https://hdl.handle.net/20.500.11839/7560

[16] “PISO algorithm - Pressure Implicit with Split Operator -- CFD-Wiki, the free CFD reference”. CFD Online. [En línea]. Disponible: https://www.cfd-online.com/Wiki/PISO_algorithm_-_Pressure_Implicit_with_Split_Operator

[17] G. Richmond, *Modelos de turbulencia introductorio*. Costa Rica, 2019. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/profile/Gustavo-Richmond/publication/335611158_Modelos_de_turbulencia_introductorio/links/5d6feeca299bf1cb80882f49/Modelos-de-turbulencia-

introductorio.pdf?__cf_chl_tk=ODO0u5PVIqpGvJ_PbxKRnhcgE.vsyQkfsuugn5q_yPc-1730389645-1.0.1.1-4p0ldSIq8NSGmX79zdA9V_plMVNudlOcz_S8z8sKVIs

[18] "What is Large Eddy Simulation (LES) in CFD? | SimWiki | SimScale". SimScale. [En línea]. Disponible: https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/large-eddy-simulation-les/

[19] "Atlas de Vientos de Colombia". Andi. [En línea]. Disponible: https://www.andi.com.co/uploads/viento.compressed.pdf

[20] R. Li *et al.*, "A Mesoscale CFD Simulation Study of Basic Wind Pressure in Complex Terrain—A Case Study of Taizhou City", *Appl. Sci.*, vol. 12, n.º 20, p. 10481, octubre de 2022. Accedido el 19 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.3390/app122010481

[21] "Courant number". Ideal Simutations. [En línea]. Disponible: https://www.idealsimulations.com/resources/courant-number-cfd/